Über die Geschwindigkeit der Entfestigung verformter Metalle durch Erholung und Rekristallisation

Von der

Technischen Hochschule zu Breslau

zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs

genehmigte

Dissertation

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Werner Globig

aus Görlitz

Referent: Prof. Dr. F. Sauerwald
Korreferent: Prof. K. Gottwein
Tag der mündlichen Prüfung: 29. Juli 1932

Berlin 1933

VDI-VERLAG GMBH

420212

Lebenslauf

Am 3. Februar 1901 wurde ich, Walter Werner Globig, in Görlitz als Sohn des Oberwerkmeisters Franz Globig geboren. Im Herbst 1922 bestand ich das Abitur vor der Staatlichen Prüfungskommission. Vom Wintersemester 1922/23 ab besuchte ich die Technische Hochschule zu Breslau und legte dort im März 1928 die Diplom-Hauptprüfung in der Fakultät für Maschinenwirtschaft ab. Nach bestandenem Diplom-Examen war ich zunächst zwei Monate in den Städtischen Wasserwerken zu Breslau tätig und erhielt Anfang Juli 1928 eine Stellung als Betriebsingenieur bei der I. G. Farbenindustrie in Wolfen, Kr. Bitterfeld; dort war ich bis zum 31. März 1930. Vom Wintersemester desselben Jahres ab widmete ich mich vorliegender Arbeit.

Über die Geschwindigkeit der Entfestigung verformter Metalle durch Erholung und Rekristallisation

Von W. GLOBIG, Breslau

Im Anschluß an frühere Untersuchungen wird der Entfestigungsvorgang an Kupfer und Eisen bei konstanter Temperatur verfolgt. Die Rekristallisation wird besonders in ihren Anfangsstadien dadurch deutlich erkennbar gemacht, daß die Untersuchungen an Werkstoff mit besonders vergröbertem Korn ausgeführt werden. Es gelingt so, zu zeigen, daß noch wesentliche Verfestigungen vorliegen können, wenn die Rekristallisation einsetzt.

Aus dem hinreichend genau beobachteten zeitlichen Verlauf der Entfestigungsvorgänge müssen sich gewisse Schlüsse auf diese und auch auf den Zustand der Verfestigung durch Verformung ziehen lassen. In früheren Arbeiten [1]) wurde festgestellt, daß es notwendig ist, die Entfestigung durch Kristallerholung und die durch Rekristallisation voneinander zu trennen, ehe es möglich ist, die Zeitgesetze der Entfestigung auch nur in großen Zügen zu bilden. Die vorliegenden Untersuchungen haben den Zweck, genauer als in den früheren Unterschungen festzustellen, wie bei einem isothermen Entfestigungsvorgang sich Erholung und Rekristallisation zueinander verhalten.

Versuchsverfahren

Die Entfestigung wurde in gleicher Weise wie früher beobachtet: Es wurden Proben bei einer bestimmten Temperatur in einem Fallhammer gestaucht, bei derselben Temperatur in einem Ofen der Entfestigung überlassen und dann die Härte bestimmt. Da sich früher herausgestellt hatte, daß die nach dem dann vorgenommenen Abschrecken der Probe ermittelte Brinellhärte der bei der Stauch- und Entfestigungstemperatur festgestellten Fallhärte recht genau proportional ist, wurde überwiegend nur noch die Brinellhärte nach dem Abschrecken bestimmt.

Für die genaue Verfolgung der Rekristallisation wurde außer der gewöhnlichen früher bereits angewandten Beobachtung ein neuer Weg beschritten. Es sollte versucht werden, durch unmittelbare Beobachtung der Neubildung einzelner Körner genaueren Aufschluß über den Beginn und die ersten Stadien der Rekristallisation zu erreichen. In einem Kristallhaufwerk von technischer Korngröße läßt sich die Entstehung und das Wachsen von Keimen bei nicht zu starken Deformationen, wie sie hier angewandt wurden, ohne weiteres nicht mehr gut beobachten. Es ist vielmehr erforderlich, ein genügend grobes Korngefüge zu erzeugen, um Entstehung und Wachstum der Keime am Einzelindividuum verfolgen zu können. Dadurch ergab sich die Notwendigkeit einer Vorbehandlung der Proben, die nachfolgend zunächst beschrieben werden muß.

Bei den Versuchen mit Elektrolytkupfer waren die Proben zylindrisch mit 15 mm Dmr. und 15 mm Höhe. Vor der Herstellung dieser Proben wurde der ganze Rundkupferstab zuerst um 5 % gedehnt. Die fertig gedrehten, abgeschnittenen Kupferproben wurden dann auf den Kreisflächen mit Schmirgelpapier geschliffen, sodann mit 50 %iger Salpetersäure stark geätzt, darauf noch einmal mit dem feinsten Papier nachgeschliffen, dann noch einmal leicht geätzt. Die Ätzungen erfolgten, um den Einfluß der Bearbeitung durch Abdrehen möglichst auszuschalten. Die Proben wurden dann bei 950 bis 1000° 16 h im Argonstrom geglüht. Sie zeigten dann schon auf ihren Stirnflächen ein grobes Korn. Für diese Beobachtung war nur noch ein Polieren und Ätzen der Probe erforderlich. Um festzustellen, ob dieses Polieren bei einer nochmaligen Glühung Veranlassung zur Rekristallisation geben kann, wurde von einigen Proben eine Mikroaufnahme gemacht, sodann wurden die Proben einem weiteren Glühprozeß von 6 h unterworfen und nochmals poliert und geätzt. Es zeigte sich bei einem Vergleich mit der Mikroaufnahme keinerlei Veränderung, so daß die wie beschrieben behandelten Proben dem eigentlichen Entfestigungsversuch zugeführt werden konnten, ohne daß man fürchten müßte, daß ihre Vorgeschichte von Einfluß auf die Entfestigung sein würde.

1) Z. Elektrochem. Bd. 37 (1931) S. 531; Z. Physik Bd. 73 (1931) S. 511

Für die einzelnen Versuchsreihen wurden die Proben so ausgewählt, daß in jeder Reihe nur ein einheitliches Ausgangskorn vorlag.

Die Entfestigungsversuche mit den so vorbereiteten Proben wurden wie folgt durchgeführt: Zuerst wurde von jeder Probe eine Mikroaufnahme der Stirnfläche gemacht. Nach Verformung und Entfestigung wurden die Proben poliert und geätzt. Für die mikroskopische Beobachtung wurde die Stelle aufgesucht, die vor der Stauchung photographiert worden war. Es war natürlich infolge der Breitung beim Stauchen eine kleine Verzerrung eingetreten, die aber nur sehr gering ist, so daß ein Vergleich der Struktur vor und nach dem Entfestigungsversuch sehr gut möglich ist. Der Fall, daß durch Gleiten der Kristalle an den Korngrenzen neue Kristallkörner freigelegt und in der Schlifffläche sichtbar werden, wodurch das Auftreten von Keimen vorgetäuscht werden kann, kann nur sehr selten eintreten, er schaltet sich bei genügend häufiger Beobachtung aus. Wirkliche Keimbildung ist vor allem auch daran zu erkennen, daß die Keime meist in Nestern auftreten. Nach der Fertigstellung des zweiten Mikrobildes wurde die Brinellhärte (5/250/30) festgestellt. Schließlich wurden die Proben ½ mm abgeschliffen, poliert, geätzt und eine nochmalige Beobachtung des Gefüges durchgeführt, um das oben gefundene Stadium der Rekristallisation nachzuprüfen. Wie die unten mitgeteilten Bilder zeigen, deckten sich beide Beobachtungen immer. Auf eine Mitteilung der sich im Mittel ergebenden Korndurchmesser kann verzichtet werden, da die Berechnung einer mittleren Korngröße bei sehr großen Korngrößenunterschieden (hier zwischen Ursprungskorn und Keim) keinen Sinn mehr hat. Ein solcher Mittelwert sagt nichts aus über die tatsächliche Raumerfüllung durch das alte eventuell noch verfestigte Korn und die nicht verfestigten neuen Kristalle, worauf es jedoch für unsere Zwecke ankommt.

Die Versuche mit Eisen wurden im Prinzip in derselben Weise wie bei Kupfer durchgeführt. Zur Verwendung gelangte Kruppsches Weicheisen in Form von zylindrischen Proben mit 13 mm Dmr. und 10 mm Höhe. Zur Erzielung eines großen Ausgangskornes wurde vor der Herstellung der Proben der Eisenstab um 6½ % gedehnt. Nach Schleifen und Ätzen der Stirnflächen wurden die Proben 16 h im Wasserstoffstrom bei 850° geglüht. Im Unterschied gegen Kupfer trat nach der Grobkornbildung das neue Gefüge nicht deutlich sichtbar an der Oberfläche hervor, sondern es war noch eine ganz dünne Schicht eines kleinen Kornes vorhanden, die durch Ätzung mit Salpetersäure entfernt wurde. Das Nachpolieren dieser Oberfläche war auch hier nicht Veranlassung für eine Rekristallisation bei einem nachträglichen fünfstündigen Glühen bei 850°.

Bei den Versuchen mit Eisen mußte mit der Möglichkeit gerechnet werden, daß sich der Zementit beim Glühen nur langsam in das Löslichkeitsgleichgewicht setzt. Bereits in unseren früheren Untersuchungen wurde jedoch festgestellt, daß unter unseren Versuchsbedingungen Alterungserscheinungen nicht auftreten. Die Oxydation der Eisenproben bei den Deformations- und Entfestigungsversuchen wurde durch Bestreichen mit Bariumchlorid verhindert.

Versuchsergebnisse

Die erste Versuchsreihe wurde mit Elektrolytkupfer von einer mittleren Ausgangskorngröße von 170 μ durchgeführt, Abb. 1. Die Stauchung betrug 19 %, die Versuchstemperatur 375°. Trotz der langen Glühzeit von 24 h war keine Rekristallisation eingetreten, so daß die ermittelte Entfestigungskurve als einer reinen Kristallerholung zugehörig betrachtet werden kann. Es ist bemerkenswert, daß reine Kristallerholung ein einfaches Abklingen der Entfestigungs-

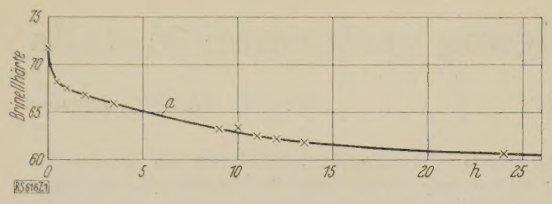

Abb. 1. Cu bei 375° um 19% gestaucht, mittlere Ausgangs-Korngröße: 170 μ

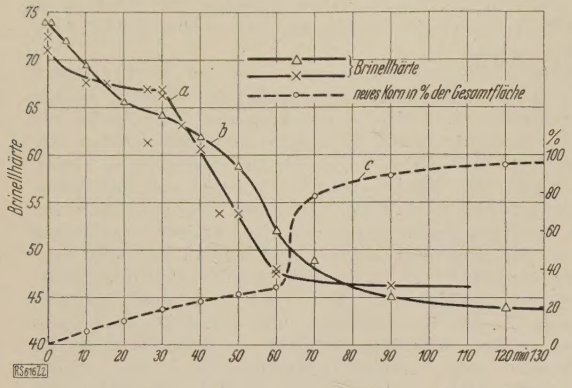

Abb. 2. a) Cu bei 420° um 20% gestaucht, mittlere Ausgangs-Korngröße: 122 μ
b) Cu bei 400° um 20% gestaucht, mittlere Ausgangs-Korngröße: 106 μ
c) Neues Korn von b in %

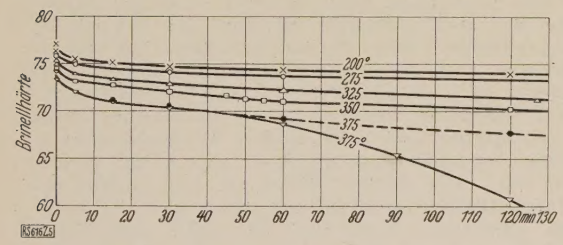

Abb. 5. Cu bei 200° bis 375° um 20% gestaucht, Ausgangs-Korngröße 96 μ bis 115 μ

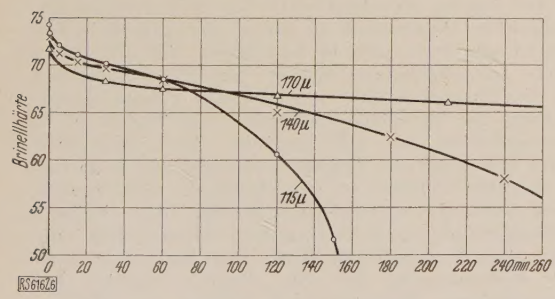

Abb. 6. Cu bei 375° um rd. 20% gestaucht, Ausgangs-Korngröße: ○ = 115 μ, × = 140 μ, △ = 170 μ

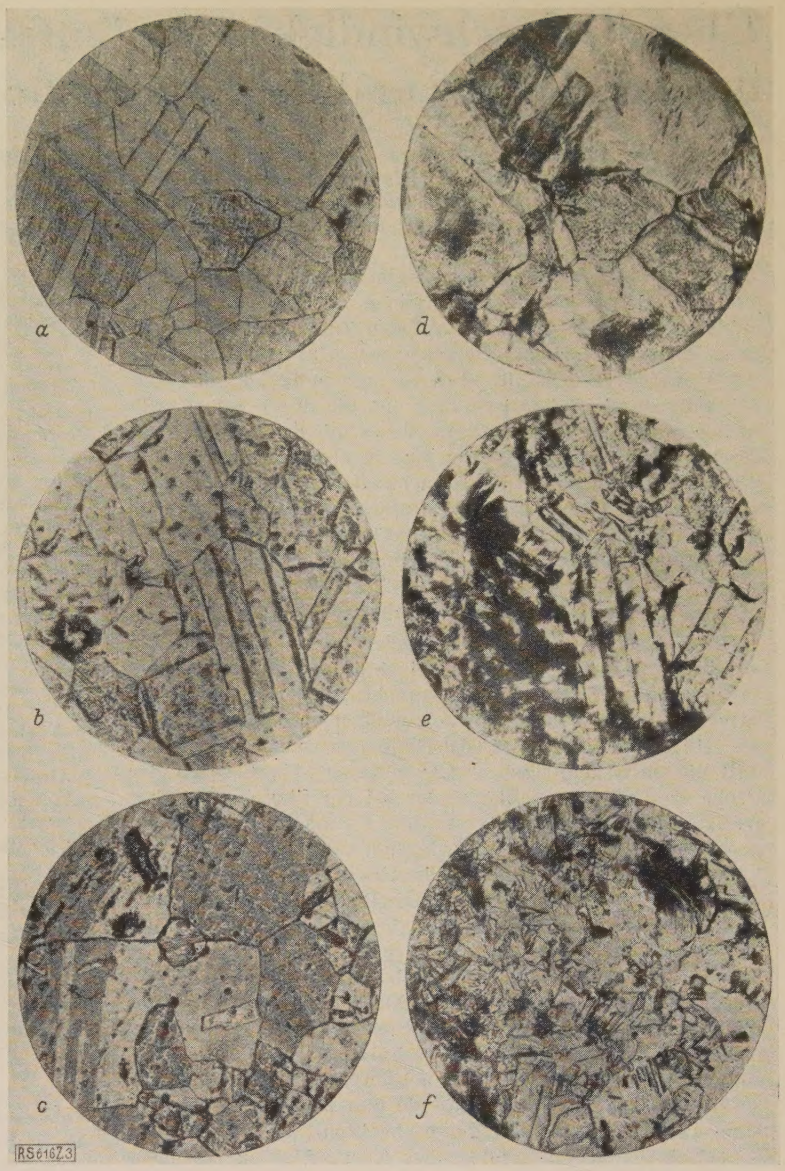

Abb. 3 a bis f. Cu bei 450° um 20 % gestaucht und entfestigt, Ausgangs-Korngröße 106 μ (3 a, 3 b, 3 c)

a ... } vor
b ... } Stauchung
c ... }

d ... } nach Stauchung und
e ... } 5 min
f ... } 60 „
90 „ } Entfestigung

65 × vergr.

geschwindigkeit mit der Zeit zeigt. Trotz der sehr langen Glühzeit trat keine völlige Entfestigung ein (Härte entfestigt 37,7). Durch Erholung ist bemerkenswerterweise nur ein Teil der Entfestigung aufzuheben.

Die nächsten beiden Versuchsreihen weisen eine Stauchung von 20 % auf. Bei der mittleren Ausgangskorngröße von 122 μ (H = 39,9) wurde bei 420°· gemessen, bei der mittleren Korngröße von 106 μ (H = 41,2) wurde bei 400° gemessen. Beide Versuche zeigten eine Induktion, wie sie schon früher gefunden worden war, Abb. 2. In Abb. 3 a bis f sind für die Versuche der Abb. 2 b und c zunächst die Aufnahmen der Stirnflächen vor und nach dem Stauchen, für die Zeiten 5,60 und 90 min wiedergegeben. Man sieht, daß erst ab 60 min eine stärkere Umgestaltung des Schliffbildes einsetzt. Nach 90 min ist das Gefüge vollständig rekristallisiert. In Abb. 4 a bis d sind die etwas unter der Stirnfläche liegenden Strukturen für die Zeiten 1/10, 30, 50 und 70 min angegeben. Man sieht, daß das grobe Korn wesentlich in Mitleidenschaft gezogen ist zwischen den Zeiten 50 und 70 min. Das stärkere Auftreten der Rekristallisation fällt deutlich in den Bereich des Wendepunktes auf der Entfestigungskurve. Dasselbe ließ sich auch für die Versuchsreihe der Abb. 2 a zeigen. Zur richtigen Abschätzung des Einflusses der Rekristallisation kann man auch versuchen, den Volumenanteil neuer Körner quantitativ zu ermitteln. Deshalb wurde bei der Versuchsreihe der Abb. 2 b und c durch Planimetrieren der Flächenanteil neu gewachsener Körner auf den Schliffbildern festgestellt und der prozentuale Anteil an der Gesamtfläche ermittelt. Die so festgestellte gestrichelte Kurve zeigt wie die qualitative Beobachtung, daß die Kornneubildung zuerst sehr langsam vonstatten geht, und erst da eine Geschwindigkeitszunahme zeigt, wo auch die Entfestigungsgeschwin-

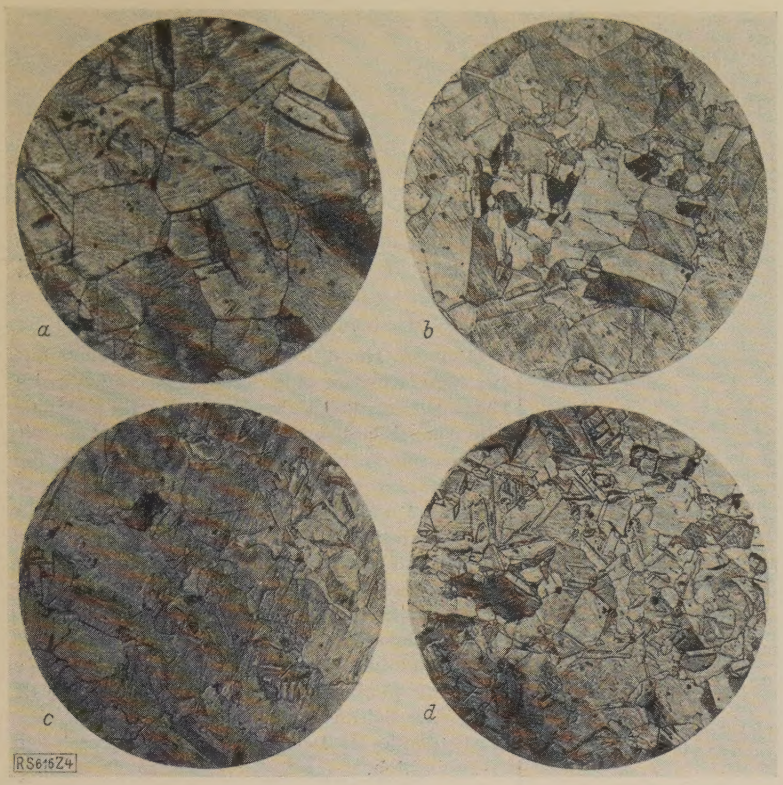

Abb. 4a bis d. Cu bei 400° um 20 % gestaucht und entfestigt, Ausgangs-Korngröße = 106 μ
a . . . $^1/_{10}$ min; b . . . 30 min } entfestigt
c . . . 50 „ d . . . 70 „ }
64 × vergr.

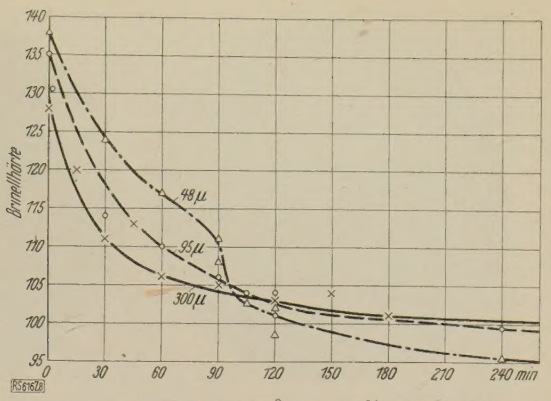

Abb. 8. Fe bei 600° um 16 % gestaucht
Korngröße: × = 300 μ; ○ = 95 μ; △ = 48 μ

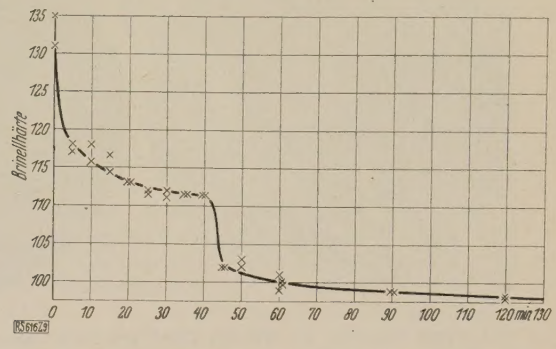

Abb. 9. Fe bei 630° um 16 % gestaucht,
Ausgangs-Korngröße: 200 μ

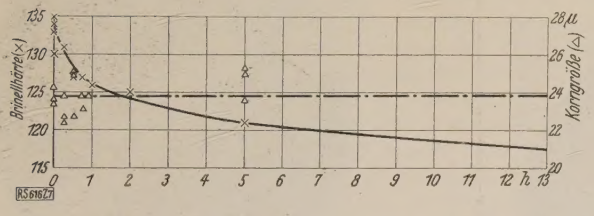

Abb. 7. Fe bei 580° um 8,6 % gestaucht,
Ausgangs-Korngröße: 24 μ

digkeit wächst. Es kann also gesagt werden, daß die schon früher aufgefundene Induktionsperiode bei der Entfestigung der zeitlichen Aufeinanderfolge der Kristallerholung und Entfestigung durch Rekristallisation zuzuschreiben ist.

Um über die Temperaturabhängigkeit der Überlagerung von Erholung und Rekristallisation etwas weiteres zu erfahren, wurden folgende Versuche ausgeführt: Es wurde die Entfestigung bei 200°, 275°, 325°, 350° und 375° einer einheitlichen Korngröße von 96 bis 115 μ und bei einer Stauchung von 20 % untersucht. Die Ergebnisse finden sich in Abb. 5. Erst die Kurve für 375°, bei der Rekristallisation einsetzte, zeigt eine Induktionsperiode. Wenn man aus den Kurven der tieferen Temperatur den Verlauf der reinen Erholung für 375° etwas extrapoliert, erhält man für diese Temperatur für den Anteil der Erholung die gestrichelte Kurve.

Wenn man die Versuche auf den Einfluß des Ausgangskornes hin durchsieht, so ergibt sich ein sehr wesentlicher Einfluß desselben. In Abb. 6 sind einige Ergebnisse zusammengestellt und es zeigt sich, daß ein Ausgangskorn von 170 μ selbst bei einer Glühzeit von 24 h keine Rekristallisation zeigt, während diese unter sonst gleichen Bedingungen bei einem Korn von 140 μ schon nach 3 h lebhaft einsetzt und ein Ausgangskorn von 115 μ nach dieser Zeit durch Rekristallisation bereits als vollkommen entfestigt betrachtet werden darf.

Die ersten Versuche mit Eisen wurden noch mit normaler Korngröße ausgeführt. Die Entfestigungsgeschwindigkeit fiel mit der Zeit, nach einer Entfestigungszeit von 12 h lag die Brinellhärte noch 30 Einheiten höher, als der vollkommenen Entfestigung entsprach (Stauchgrad 12 %, Temperatur 530°). Abb. 7 zeigt einen weiteren derartigen Versuch, es lag hier, wie die Beobachtung der unveränderten Korngröße zeigt, sicher eine reine Erholung vor. Die Härte im entfestigten Zustande ist 100. Die Entfestigung durch Erholung klingt einfach mit der Zeit ab und ist nicht vollständig.

Die mittlere Ausgangskorngröße für die folgenden Versuche mit grobem Korn betrug 300 μ (H = 75,5), gestaucht wurde um 16 % und die Versuchstemperatur betrug 600°. Die entsprechende Kurve ist in Abb. 8 aufgenommen, sie zeigt einen einfachen abfallenden Verlauf, es trat keine Rekristallisation ein. Eine weitere Versuchsreihe wurde unter sonst gleichen Bedingungen mit einer Korngröße von 95 μ (H = 83,5) ausgeführt; wie die Kurve in Abb. 8 zeigt, ist hier ebenfalls ein einfaches Abklingen der Entfestigungsgeschwindigkeit mit der Zeit festzustellen, es trat keine Rekristallisation ein. Um die Verhältnisse bei eintretender Rekristallisation studieren zu können, wurde deshalb die Temperatur für den nächsten Versuch auf 630° erhöht. Die Korngröße betrug 200 μ (H = 93,1). Abb. 9 läßt nun zum ersten Male deutlich eine Induktionsperiode erkennen. Bei der vergleichenden Untersuchung der Schliffbilder vor und nach dem Stauchen, Abb. 10 a bis d, ist bei den Bildern nach 45 min deutlich eine Rekristallisation zu erkennen. Dasselbe zeigen die Schliffbilder, die etwas unterhalb der Stirnfläche beobachtet wurden, Abb. 11 a bis d. Eine stärkere Umgestaltung des Schliffbildes ist von 35 min an zu erkennen; nach

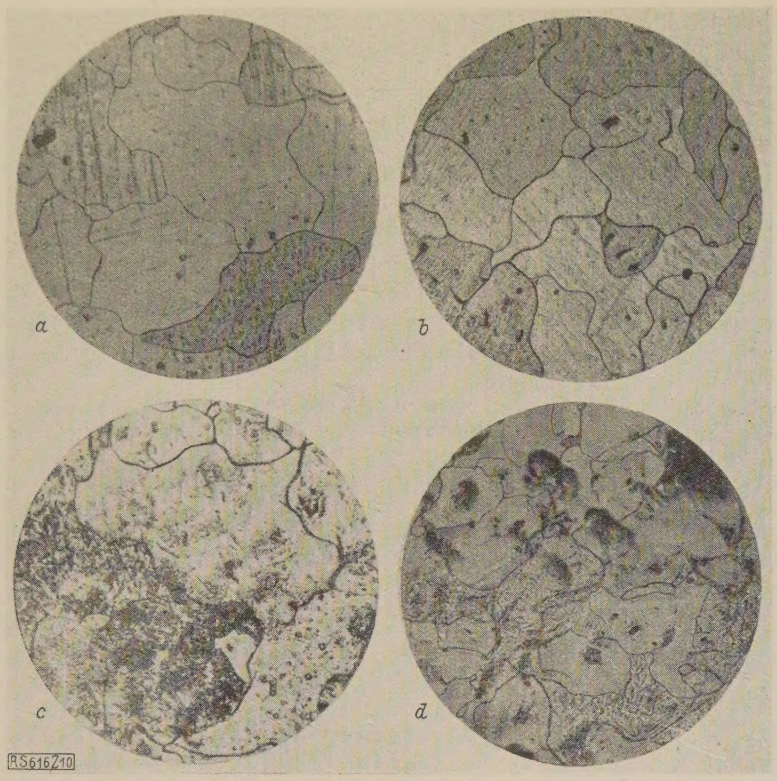

Abb. 10a bis d. Fe bei 630° um 16% gestaucht und entfestigt, Ausgangs-Kongröße = 200 μ (10a, 10b)
a ... vor Stauchung, c ... nach Stauchung und 10 min, b ... vor Stauchung, d ... nach Stauchung und 45 „ Entfestigung
65 × vergr.

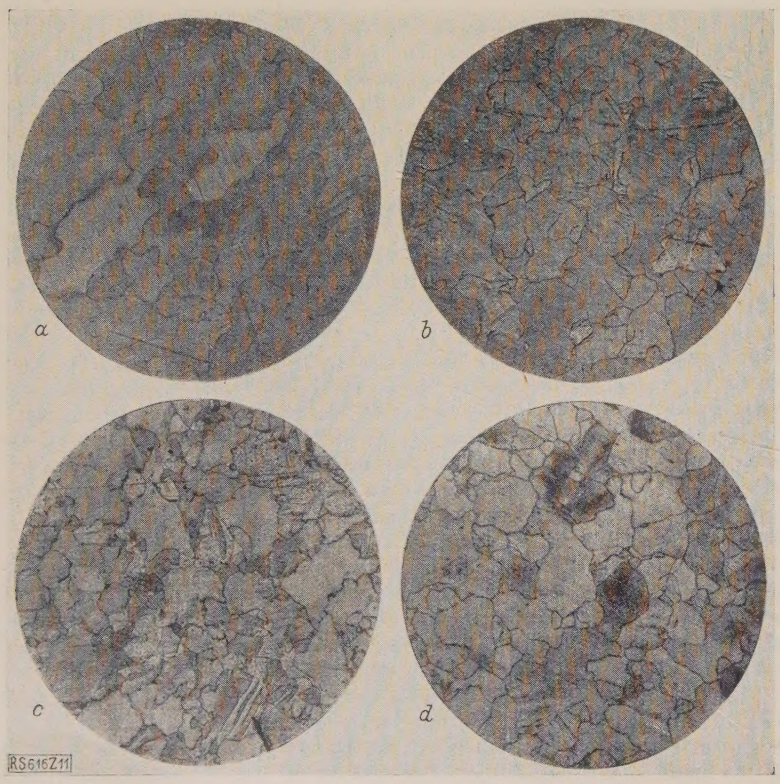

Abb. 11a bis d. Fe bei 400° um 20% gestaucht und entfestigt, Ausgangs-Korngröße = 200 μ
a ... 1/10 min; b ... 35 min, c ... 40 „ d ... 45 „ entfestigt
35 × vergr.

Abb. 12 u. 13.

Nachtrag
zu den Gefügebeobachtungen

Eine bemerkenswerte Gefügebeobachtung an Kupfer

Bei der Herstellung der Kupferproben mit grobem Korn wurde nach der Glühzeit im Argonstrom die Wahrnehmung gemacht, daß die Oberfläche der geschliffenen Ebenen mit einem feinen, bereits mit bloßem Auge wahrnehmbaren Liniengewirr überzogen war (Abb. 12 und 13). Wie aus ihrem Verhalten zu Zwillingskristallen hervorgeht, sind diese Linien offenbar gesetzmäßig mit dem Kristallaufbau verbunden. Doch macht ihre Erscheinungsform besonders in Abb. 13 große Schwierigkeiten der Deutung. Auch wenn man annimmt, daß die entstandene Figur als Schnitte wenig gebogener Flächen im Kristall mit der Schliffläche sich ergeben, ist das auftretende Maß der Krümmung nur schwer verständlich.

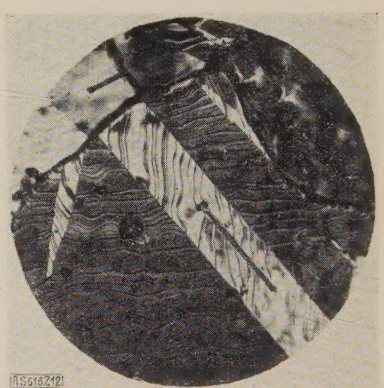

Abb. 12. (130 × vergr.)

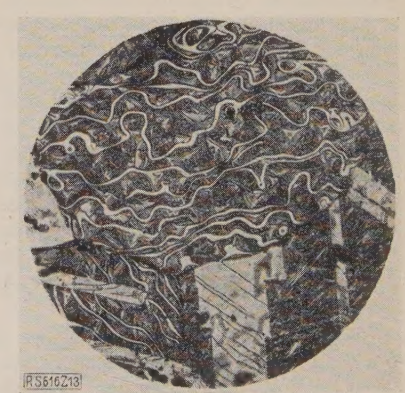

Abb. 13. (130 × vergr.)

40 min ist bereits wieder eine Kornvergröberung der Keime zu beobachten. Dem entspricht es, daß in diesem Zeitintervall die Entfestigungsgeschwindigkeit stark wächst. Einige weitere Versuchsergebnisse an feinkörnigem Material bestätigten dieses allgemeine Ergebnis, daß das Eintreten der Rekristallisation in stärkerem Umfange die Entfestigungsgeschwindigkeit steigert. Eine dieser Kurven ist noch in Abb. 8 aufgenommen, die Korngröße betrug 48 μ ($H = 90$). Die Induktionsperiode ist zwar nicht sehr deutlich, aber der Zusammenhang mit der Rekristallisation ist, wie die Beobachtung der Schliffbilder zeigt, unverkennbar. Es scheint so, als ob der durch Erholung zu erzielende Anteil der Entfestigung bei Eisen größer ist als bei Kupfer.

Abb. 8 kann dazu dienen, auch bei Eisen den Einfluß der Ausgangskorngröße auf die Entfestigung und die Rekristallisation deutlich zu machen. Wie bei Kupfer zeigt sich, daß mit gröberem Ausgangskorn der Eintritt der Rekristallisation erschwert wird und daß dadurch die Gesamtentfestigung hintan gehalten wird. Nach einer Zeit von 4 h hat z. B. bei einem Ausgangskorn von 300 und 95 μ keine Rekristallisation eingesetzt, während ein Material mit einem Ausgangskorn von 48 μ schon vollkommen entfestigt ist und auch bereits ein vollkommen neues Strukturbild zeigt. Der tiefere Grund dafür ist offenbar, daß bei gleichem Stauchgrad und bei gleicher Temperatur das grobe Korn die geringste Verfestigung erfährt.

Weitere Besprechung der Ergebnisse insbesondere an Hand des Schrifttums

Eine Erörterung einschlägiger vorliegender Arbeiten ist bereits von Scholz und Sauerwald begonnen worden. Zur Frage des äußeren Bildes der Entfestigungsvorgänge in Abhängigkeit von der Zeit unter technologischen Verhältnissen sind noch zwei Arbeiten nachzutragen. In einer Arbeit von L. Sterner-Rainer[2]) wird die Entfestigung von Edelmetallegierungen untersucht und eine einfache Abnahme der Entfestigungsgeschwindigkeit mit der Zeit festgestellt. Dasselbe Ergebnis hat eine Untersuchung von P. Siebe[3]) über verschiedene Metalldrähte. Bemerkenswert ist hier noch, daß die Dehnungen nach erheblich längerer Glühzeit ihren Endwert erreichten als die Festigkeiten. Im nachfolgenden sollen noch Versuchsergebnisse aus Arbeiten zum Vergleich herangezogen werden, die in Zusammenhang mit den hier neu vorliegenden Ergebnissen gebracht werden können. Zunächst möge die Feststellung behandelt werden, daß Entfestigung noch verläuft, während die Kristallneubildung in Gang kommt. Karnop und Sachs stellen in ihrer Arbeit: „Versuche über die Rekristallisation von Metallen“ [4]) die Frage, ob die Keimbildung wesentlich später einsetzt als die mechanische Entfestigung. Bei der röntgenographischen Untersuchung eines Aluminiumkristalles, der 15 % gedehnt wurde, zeigten Laue-Aufnahmen ein und desselben Kristalles vor und nach dem Glühen bei 400° noch keine Änderung, während eine wesentliche Entfestigung festgestellt werden mußte.

Wesentlich ist ferner eine andere Arbeit derselben Verfasser[5]), die feststellen, daß die Keimbildung erst nach einer gewissen Glühzeit einsetzt. Hierbei wurde die lineare Größenänderung eines Aluminiumkristalles in Abhängigkeit von der Zeit untersucht und hierbei ein der Zeit proportionaler Wachstumsverlauf festgestellt. Durch Extrapolation des linearen Verlaufes nach der Korngröße 0 hin wurde gefunden, daß die Keimbildung erst nach Verlauf einer gewissen Glühdauer einsetzen kann. Außerdem wurde beobachtet, daß die Entstehung der einzelnen Kristalle nicht zeitlich zusammenfällt. Diese Ergebnisse über die Keimbildung stimmen mit den Beobachtungen überein, die in vorliegender Arbeit an den Schliffbildern gemacht werden konnten. Sie schließen unsere weitergehende Beobachtung nicht aus, daß auch, wenn die Keimbildung und ihr Wachstum langsam erfolgt, doch zu gleicher Zeit noch wesentliche Verfestigungen vorliegen.

Ein Widerspruch zu den erhaltenen Versuchsergebnissen würde sich mit der zuletzt angeführten Abeit von Karnop und Sachs ergeben, wenn man die dort gefundene Unabhängigkeit der Kornwachstumsgeschwindigkeit von der Zeit als immer geltendes Zeitgesetz der Rekristallisation auffassen wollte. Wie bereits von Tammann[6]) und in der Arbeit von Scholz ausgeführt wurde, ist dies jedoch nicht möglich, infolgedessen kann man auch nicht allgemein annehmen, daß das Kornwachstum von den mit der Verfestigung verbundenen Änderungen im Raumgitter unabhängig sei.

Mit dem Verhältnis von Kristallerholung und Rekristallisation befassen sich ferner Carpenter und Elam[7]). Sie stellen fest, daß Aluminium, welches vor der Rekristallisation weitgehend durch Erholung entfestigt war, nach dem Erhitzen auf höhere Temperatur dasselbe Kornwachstum zeigte, als nicht vorher entfestigtes Material. Wie schon Reischauer und Sauerwald[7a]) bemerkt haben, kann jedoch diese Beobachtung nicht so gedeutet werden, daß allgemein die Rekristallisation nicht mit den Zuständen der Entfestigung zusammenhängt; denn bei dem angewandten, nicht isothermen Untersuchungsverfahren entzieht sich dieser Einfluß dann der Beobachtung, wenn die Proben beim Durchschreiten der Temperaturgebiete unmittelbar unterhalb der unteren Rekristallisationstemperatur sich mit großer Geschwindigkeit alle in derselben Weise entfestigen.

Während also die vorgenannten Untersuchungen nicht als unseren Ergebnissen widersprechend aufgefaßt zu werden brauchen, hat eine ganze Reihe anderer Arbeiten die von uns nachgewiesene Möglichkeit des Bestehenbleibens der mit der Verfestigung verbundenen besonderen instabilen Zustände des Raumgitters während des ersten Stadiums der Rekristalisation zur Voraussetzung. Es seien angeführt die Arbeiten von van Liempt[8]), Dehlinger[9]), van Arkel[10]), Masing[11]), Sutoki[12]). Ein einfaches Abklingen der Erholung mit der Zeit ist in Übereinstimmung mit unseren Versuchen neuerdings von Tammann und Mitarbeitern festgestellt worden[13]).

Mit der eben behandelten Frage in einem engen Zusammenhang steht die Frage, ob die Entfestigung bei einer bestimmten Temperatur bis zu einem gewissen Grade erfolgt, dann aber der Verfestigungsrest lange Zeiten erhalten bleiben kann. Nach den mitgeteilten Ergebnissen hat es den Anschein, als ob im Gebiet der Kristallerholung eine solche Erscheinung möglich ist, wenigstens unter Berücksichtigung praktisch zunächst übersehbarer Zeiträume. Wie auf der Hand liegt, ist die Existenz eines solchen Restwertes der Verfestigung im Gebiet der Kristallerholung von grundlegender Bedeutung für die Frage der Dauerstandsfestigkeit, da eigentlich nur sie eine Dauerstandsfestigkeit nach einmal eingetretenem Fließen des Materials verbürgt, wie sie tatsächlich festgestellt wird[14]). Diese Erscheinung ist weiterhin von grundsätzlicher Bedeutung für die Möglichkeiten von Glühprozessen nach Kaltbearbeitung, die nur Spannungen entfernen, Verfestigungen dagegen erhalten wollen[15]).

2) Z. Metallkde. Bd. 19 (1927) S. 149
3) ebenda, S. 385
4) Z. Physik Bd. 42 (1927) S. 283
5) ebenda, Bd. 60 (1930) S. 464
6) Z. anorg. Chem. Bd. 191 (1930) S. 69
7) Journ. Inst. Met. Bd. (1922) S. 83
7a) Metallwirtsch. Bd. 11 (1932) S.
8) Z. anorg. Chem. Bd. 195 (1931) S. 366
9) Z. Metallkde. Bd. 22 (1930) S. 221
10) ebenda, S. 207
11) Z. Metallkde. Bd. 12 (1920) S. 457
12) The 195th report from the Research Inst. for Iron, Steel, and other Metals
13) Tammann, Z. Metallkde. Bd. 24 (1930) S. 220
14) Sauerwald: Lehrbuch der Metallkunde S. 151, Abb. 127, Kurve IV
15) Sauerwald: Lehrbuch der Metallkunde S. 422

Eine durch die vorliegenden Versuche weiter geklärte Frage, die jedoch im Schrifttum noch recht umstritten ist, ist die, ob das Ausgangskorn auf die Rekristallisation von Einfluß ist. Ein solcher Einfluß ist vorhanden und zum Teil früher bereits festgestellt [16]). Es gibt allerdings offenbar Korngrößenbereiche, wo sich ein Einfluß der Korngröße nicht bemerkbar macht [17]).

Zusammenfassung

An Systemen aus großen Kristallen, an denen das Anfangsstadium der Rekristallisation gut beobachtet werden konnte, wurde der Verlauf der Entfestigung durch Erholung und Rekristallisation verfolgt. Es gibt, wie früher auch bereits vermutet, drei verschiedene Temperaturgebiete, in denen das Verhältnis der Geschwindigkeit der Entfestigung durch Erholung zu der durch Rekristallisation ein wesentlich verschiedenes ist. Im tiefsten Temperaturgebiet tritt überhaupt nur Erholung auf. Diese braucht auch in langen Zeiträumen nicht zu einer völligen Entfestigung zu führen. Bei dieser Erholung wurde bis jetzt nur ein einfaches Abklingen der Geschwindigkeit mit der Zeit ermittelt. Bei den höchsten Temperaturen erfolgt auch von Anfang an die Rekristallisation mit sehr großer Geschwindigkeit. Dazwischen gibt es Temperaturgebiete, in denen zunächst Erholung nach dem oben genannten Gesetz eintritt, während die Entfestigung durch die geringe Zahl der nacheinander entstehenden Keime, die nur langsam wachsen, wenig beeinflußt wird. Erst später, wenn die neugebildeten Kristalle immer größere Räume einnehmen, können sie zur Entfestigung stärker beitragen, wodurch dann die Entfestigungsgeschwindigkeit gesteigert wird und ein Wendepunkt auf den Kurven der Entfestigung entsteht. Besonders dieses letztere Gebiet ist deshalb von wesentlicher allgemeiner Bedeutung, weil durch die hier vorgenommenen Versuche nachgewiesen wird, daß während des Kristallwachstums noch Verfestigungen vorliegen können. Der mit der Verfestigung verbundene instabile Zustand des Raumgitters hat dann offenbar Gelegenheit, sich bei Keimbildung und Kristallwachstum auf die Rekristallisation auszuwirken. [RS 616]

Breslau, Technische Hochschule, Lehrstuhl für Metallkunde

Eingegangen 27. Juli 1932

16) Sauerwald: Lehrbuch der Metallkunde S. 127

17) Hanemann-Werkstoffausschuß-Bericht Nr. 84 (1926) Verein deutscher Eisenhüttenleute

Triasdruck GmbH, Berlin SW 19